



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

PRINCIP AUTONOMNÍCH SKLENÍKŮ

THE WORKINGS OF AUTONOMOUS GREENHOUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Formánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Patrik Elbl

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Adam Formánek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Patrik Elbl**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Princip autonomních skleníků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Globální populace se rapidně zvyšuje společně s poptávkou po zdravých a čerstvých potravinách. Skleníkový průmysl může hrát důležitou roli, avšak setkává se s obtížemi při hledání kvalifikovaného personálu pro řízení rostlinné výroby. Jednou z možných cest je použití umělé inteligence. Autonomizací skleníkových komplexů lze ušetřit nejen lidské zdroje, ale zvýšit efektivitu produkce pěstovaných potravin.

Cíle bakalářské práce:

- Zpracovat základní problematiku autonomních skleníků a jejich součástí.
- Popsat způsoby regulace autonomních skleníků.
- Popsat soutěžní scénu autonomních skleníků a její význam.
- Porovnat výhody/nevýhody oproti tradičním skleníkům.

Seznam doporučené literatury:

NISE, Norman S. Control systems engineering. Seventh edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-80082-9.

PONCE CRUZ, Pedro. Greenhouse design and control. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2014. ISBN 978-1-315-77155-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato rešeršní bakalářská práce si klade za cíl zkoncentrovat znalosti z rozsáhlé literatury zabývající se autonomními skleníky a tématy s nimi spojenými. První část práce je zaměřena na základní pojmy spojené s autonomními skleníky. V druhé části je vysvětleno množství pojmů spojených s logickým aparátem a principy logiky v těchto sklenících využívaných. Dále se práce zabývá fyzickými aparáty inteligentních skleníků, především aktuátory. Nakonec soutěžími úzce spojenými s touto problematikou, s důrazem na soutěžní podmínky a logiku.

Abstract

This research work aims to concentrate information from extensive literature dealing with autonomous greenhouse related topics. The first part of the work is focused on basic concepts related to autonomous greenhouses. The second part explains an amount of concepts defining the logical apparatus and logical principles used in autonomous greenhouse design. Furthermore, this work deals with the physical apparatus of intelligent greenhouses, primarily its actuators. Finally it deals with autonomous greenhouse competitions, with focus on their conditions and logic.

Klíčová slova

Autonomní skleník, inteligentní skleník, regulace prostředí skleníku, soutěž autonomních skleníků

Key words

Autonomous greenhouse, intelligent greenhouse, greenhouse environment regulation, autonomous greenhouse competition

Bibliografická citace

FORMÁNEK, Adam. *Princip autonomních skleníků*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124663>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Patrik Elbl.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Princip autonomních skleníků” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30. května 2020

.....

Adam Formánek

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Patriku Elblovi za cenné rady, připomínky a odborné vedení po celou dobu řešení bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Cíl práce.....	11
3 Základní popis autonomního skleníku.....	12
3.1 Součásti autonomního skleníku.....	12
3.2 Výhody/Nevýhody.....	13
3.3 Komponenty kontrolovaného prostředí skleníku.....	14
4 Základy kontroly autonomního skleníku.....	15
4.1 Složení.....	15
4.2 RTOS.....	15
4.3 FPGA.....	15
4.4 Kaskádové smyčky.....	16
4.5 CompactRIO.....	17
4.6 PID (proportional-integral-derivative).....	18
4.7 HMI (Human-machine interface).....	18
4.8 RHOC (Receding horizon optimal control).....	20
5 Pokročilá kontrola autonomního skleníku.....	21
5.1 Neuronová síť.....	21
5.1.1 Backpropagation neuronová síť.....	22
5.2 Metody pokročilé kontroly autonomních skleníků a práce jimi se zabývající.....	23
5.2.1 Fuzzy regulace.....	23
5.2.2 RST (rough sets theory).....	24
6 Senzory pro monitorování skleníku.....	25
6.1 Základní popis a rozdělení.....	25
6.2 Parametry senzorů.....	26
6.3 Umístění.....	27
7 Aktuátory.....	28
7.1 Ventilace a aktivní chlazení.....	28
7.1.1 Ve skleníku nejčastěji využívané aktivní chladicí systémy.....	28
7.2 Topné systémy.....	30
7.2.1 Ve skleníku nejčastěji využívané topné systémy.....	30
7.3 Zavlažovací systémy.....	31
7.3.1 Nejčastější zavlažovací systémy pro substrátové skleníky.....	31
7.3.2 Hydroponie.....	32
8 Soutěže v návrhu umělé inteligence pro pěstování určené plodiny.....	34
8.1 Základní specifiky.....	34
8.2 Součásti autonomních skleníků univerzity Wageningen.....	35
8.3 Řízení.....	36
8.4 Princip protichůdných efektivit pěstování.....	36
8.5 Umělá inteligence a modely.....	37
8.6 Přístupy jednotlivých týmů.....	37
8.6.1 Vítězný přístup.....	39
9 Závěr.....	40
10 Seznam použitých zdrojů.....	41
11 Seznam Obrázků.....	44

1 Úvod

Globální populace se rapidně zvyšuje a dle současných populačních modelů tomu nebude jinak ani v budoucnu. To znamená nárůst spotřeby a s tím spojené nutnosti zvýšení produkce potravin. Neobydlených ploch na Zemi stále ubývá, což zásadním způsobem ztěžuje expanzi prostor na niž jsou potraviny pěstovány. Pokud tedy nelze zvyšovat velikosti ploch na niž jsou potraviny produkovány, je potřeba navyšovat množství pěstovaných potravin při stejných plochách. Toho lze dosáhnout skleníky. Skleníky lze automatizovat, čímž lze dosáhnout vyšších produktivit, nižších spotřeb energie a vyšších výnosů, s užitím méně lidských zdrojů, pokud dále převedeme i pozorovací a rozhodovací procesy na umělou inteligenci - vznikají autonomní skleníky.

Fungující autonomní skleník se skládá ze správně navržené vnější struktury skleníku, senzorických systémů, aktuátorových soustav, kontroly, regulace a inteligentního, adaptabilního algoritmu, které dohromady musí být schopny nalézat správné hodnoty složek prostředí ve skleníku s uvažováním nákladů na provoz, následně jich dosáhnout a udržet je.

Zá účelem maximální efektivity pěstování dané rostliny, je nutné zjistit podmínky, při kterých se této rostlině daří nejlépe. V přírodě ovšem na rostlinu působí obrovské množství vlivů, a proto nelze z rostlin pěstovaných v přirozeném prostředí vyvodit ideální hodnoty jednotlivých proměnných pro jejich pěstování. Také definice toho, co je maximální efektivita pěstování může být problematickou, jelikož plodiny mají množství kvalitativních charakteristik, jako jsou barva, chuť, tvar, velikost, které jdou často proti sobě (např. větší plod - méně chuti). Rozhodujícím faktorem pro industriální produkci je kvantita, jejíž navyšováním při optimalizaci produkce mohou trpět kvalitativní charakteristiky produktu.

Pro zjištění ideálních podmínek pro pěstování dané rostliny je nutné přesunout její pěstování do prostoru s kontrolovaným prostředím - skleníku, v němž lze účinky vlivů na rostlinu bez přestání monitorovat a analyzovat.

Odezvy rostliny na změny hodnot prostředí v běžném skleníkovém systému jsou pozorovány a vyhodnocovány pěstiteli, kteří optimalizují dynamické chování systému na základě dlouhodobých zkušeností a intuice. V moderních, autonomních, sklenících může být přenecháno pozorování, řízení a rozhodování umělé inteligenci. Díky nárůstu výkonů, paměti a inteligentním sítím jsou nyní algoritmy schopny učit se a adaptovat základ empirických poznatků od pěstitelů na podmínky ve sklenících v reálném čase, tak dosahovat lepších výsledků než pěstitelé, s podstatně nižšími nároky na lidskou pracovní sílu.

Prvotním účelem autonomního skleníku je umožnit nalezení ideálních podmínek pro danou rostlinu. Řešení probíhá způsobem regulovaného pokusu/omylu, a proto i se vstupem od expertů zabývajících se pěstitelstvím, kteří udávají výchozí stav pro následné iterace, lze předpokládat, že pro nalezení podmínek blížících se ideálním je třeba vyzkoušet mnoho kombinací parametrů prostředí skleníku a mnoho životních cyklů pěstovaných rostlin. Hlavním aspektem působícím problémy při regulaci skleníku je proměnné, těžko předvídatelné vnější prostředí. Proto se využívá meteostanic a predikčních algoritmů, aby byl skleník schopen zachovat vhodné podmínky pro rostliny i v nepříznivém počasí.

Následně mohou být poznatky získané v autonomních sklenících nastaveny a udržovány pro vysokou efektivitu i ve sklenících neschopných strojového učení. Naměřená data mohou být použita jako výchozí bod pro následující změny vstupních nastavení prostředí, což umožňuje další zdokonalování regulačních algoritmů při dalších rostlinných cyklech.

Poznatky získané inteligentními algoritmy lze následně do určité míry aplikovat nejen na jednodušší skleníkové systémy, ale mohou také sloužit jako návod při výběru lokalit u venkovním zemědělství.

2 Cíl práce

Cílem této rešeršní práce je komplexní nastínění problematiky autonomních (hi-tech) skleníků se zaměřením na jejich principy a principy technologií a metod využitých v jejich konstrukci a regulaci.

Subcíly, které je nutno splnit jsou:

- Zpracování základní problematiky autonomních skleníků a jejich součástí.
- Popis způsobů regulace autonomních skleníků.
- Popis soutěžní scény spojené s autonomními skleníky a její význam.
- Porovnání výhod/nevýhod oproti tradičním skleníkům.

3 Základní popis autonomního skleníku

3.1 Součásti autonomního skleníku

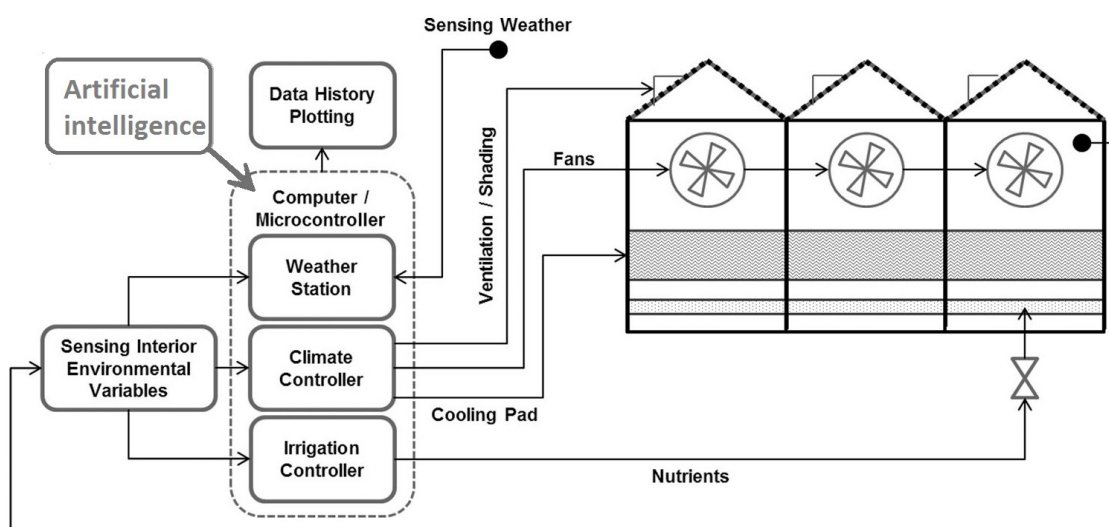
Každý inteligentní systém, zde inteligentní skleník, musí obsahovat následující členy:

- **Senzory**
- **Aktuátory**
- **Kontrolery**

Jejich konkrétní příklady aplikovatelné v autonomních sklenících a jejich aplikace budou popsány v dalších kapitolách této práce.

Autonomní skleníky dále obsahují **umělou inteligenci**, často založenou na strojovém učení. Některé principy a příklady budou uvedeny.

Lze tedy říci, že autonomní skleník je inteligentní skleník řízený umělou inteligencí.^[19]



Obrázek 3.1: Schéma autonomního skleníku^[1]



Obrázek 3.2: Vnitřní prostor autonomního skleníku Wageningenské univerzity^[7]

3.2 Výhody/Nevýhody

Výhody

- Je třeba podstatně méně personálu.
- Algoritmus založený na strojovém učení je po dostatečné době učení schopen dosáhnout vyšší produkce a efektivity než běžný skleník.
- Mnoho skleníků může být kontrolováno jediným počítačem, který může porovnávat jejich efektivity v závislosti na různých rozhodnutích algoritmu a tím urychlit jeho učení.
- Tento počítač je schopen zaznamenávat data o prostředí, která mohou být následně analyzována a v kombinaci s daty o sklizni použita pro další zdokonalení systému.
- Počítač je také schopen zjistit a upozornit na kritické hodnoty prostředí, poruchy senzorů a podsystémů.
- Správně nastavený systém je schopen na základě předpokládané změny počasí upravit nastavení systému za účelem úspory energie v porovnání s běžně regulovaným skleníkem.

Nevýhody

- Návrh a konstrukce autonomního skleníku jsou velmi nákladné a vyžadují experty z různých oborů.
- Dokončený systém autonomních skleníků má také technicky náročnou údržbu a vyžaduje kvalifikovaný, i když nečetný personál.

Z porovnání z výhod s nevýhodami lze vyvodit, že jsou v současné době jsou autonomní skleníky spíše záležitostí týkajících se velkých, technologických společností nežli běžných zemědělců. Zároveň je ale třeba uvážit, že ceny elektroniky a inteligentních systémů neustále klesají, umělá inteligence se rychle zdokonaluje a výkon hardwaru pro aplikace v umělé inteligenci velmi rychle roste.

3.3 Komponenty kontrolovaného prostředí skleníku

Účelem autonomního skleníku je regulovat mikroklima rostlin za účelem co nejlepší sklizně.

Aby bylo možné navrhnout strukturu skleníku tak, aby umožňovala smysluplnou kontrolu vnitřního prostředí, je třeba porozumět ideálnímu mikroklimatu rostlin.

Mikroklima se skládá z působení 5 komponent^[1]:

- **Prostředí kořenů**
- **Intenzita světla**
- **Koncentrace CO₂**
- **Teplota**
- **Vlhkost vzduchu**

Prostředí kořenů

Přímo ovlivňuje růst rostliny. Skládá se z živin, ve formě chemických látek, rozpuštěných v půdě nebo tekutém roztoku (hydroponie). V závislosti na fázi růstu se ideální hodnoty živin pro výživu rostliny mění. V autonomních sklenících se často používá hydroponické řešení, jehož vlastnosti lze snáze regulovat.^{[1][19]}

Intenzita světla a množství oxidu uhličitého

Tyto pojmy jsou spolu úzce svázané, jelikož intenzita světla ovlivňuje rychlost fotosyntézy, ale jen za přítomnosti dostatku oxidu uhličitého. Fotosyntéza je proces přeměny vody a CO₂ na uhlohydráty tvořící rostlinu, za využití záření jako zdroje energie pro chemickou reakci.

Pokud se v prostředí rostliny nevyskytuje dostatek CO₂, zvyšování množství záření nebude mít účinek na rychlost konání fotosyntézy a tím pádem ani rychlost růstu, stejně tak to platí i naopak.

CO₂ je v uzavřeném prostředí rostlinami spotřebováváno, a je proto potřeba jej do uzavřeného skleníku dodávat.^{[1][19]}

Teplota

Ovlivňuje všechny fyziologické procesy rostliny, včetně rychlosti fotosyntézy, rostlinného dýchání, reprodukce a přesunů chemických látek v rostlině.

Její ideální hodnota závisí na stáří rostliny, fázi růstu a ročním období.^{[1][19]}

Vlhkost vzduchu

Ovlivňuje vývoj listů a propustnost CO₂ póry listů, která je důležitá při fotosyntéze.

Příliš vysoká hodnota vlhkosti vzduchu podporuje růst plísní a redukuje úrodu.^{[1][19]}

4 Základy kontroly autonomního skleníku

4.1 Složení

Systém kontroly prostředí se skládá z senzorů a kontrolerů, které na základě vstupů z senzorických členů řídí množství aktuátorů (zařízení měnících elektrickou energii na jinou formu energie, jako je tepelná nebo mechanická). Tyto kontrolery jsou dále napojeny na centrální počítač, který alternuje jejich předpisy a kontroluje jejich funkčnost.

Regulace autonomních skleníků pracuje s množstvím časově proměnných vnějších vlivů, jako je venkovní teplota, slunečnost nebo vlhkost vzduchu, proto je nutné regulovat soustavu v reálném čase.

Výkyvy systému způsobené venkovními podmínkami jsou těžko predikovatelné a modelovatelné. Jedná se o nelineární (závisí na více nezávislých proměnných), více vstupový, více výstupový (multi input-multi output; MIMO), časově proměnný, spárovaný (coupled) model (skládá se z více propojených modelů), což je také jedním z důvodů, proč je problematické popsat skleníkové systémy analytickými modely nebo je kontrolovat klasickými controllery jako je PID.

Pokročilé digitální systémy umožňují rychlou implementaci komplexních předpisů do digitálních kontrolerů.^[1]

4.2 RTOS

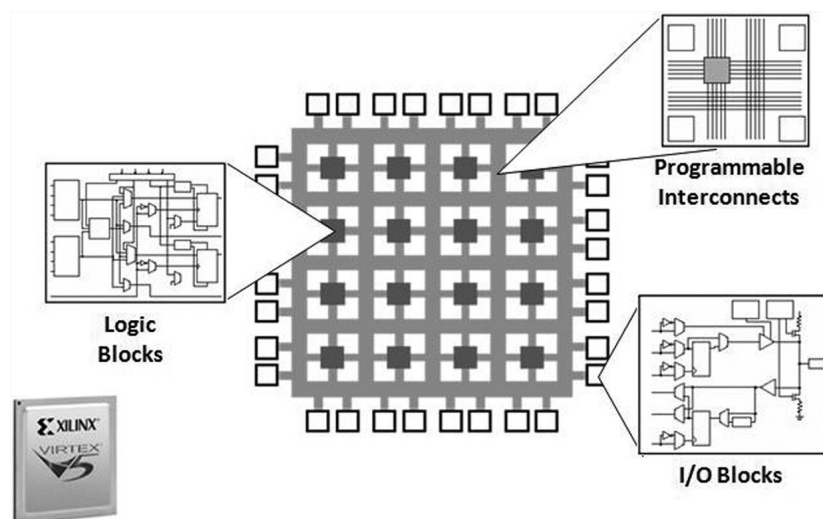
Jedním z nejlepších způsobů jak aplikovat nové předpisy do kontrolerů je použití RTOS (real-time operating system), což je systém schopný spolehlivě vykonávat programové instrukce jednoho programu v požadovaných časových intervalech. RTOS dokáže provádět úkony s garancí provedení v určitém čase, prioritizace různých sekcí programu, provádět cykly s téměř stejným načasováním při každém opakování a detekovat, pokud cyklus není s cílovým načasováním proveden. Díky těmto vlastnostem může celý systém zůstat funkčním bez vnějšího zásahu i celé roky, což je u autonomních skleníků, které potřebují být regulovány 24 hodin denně zásadní. Z tohoto důvodu systém většinou obsahuje hlídač (watchdog), který v případě že dojde k programové chybě celý systém restartuje. Také samotný hardware real-time systémů bývá navržen tak, aby vydržel tvrdé podmínky po dlouhou dobu.

RTOS programem je například LabView, což je škálovatelné grafické programovací prostředí integrovatelné do tisíců různých fyzických platform.^[1]

4.3 FPGA

Field programmable gate array, je programovatelný čip, skládající se z logických bloků, programovatelných spojení a I/O bloků, viz. Obr. 4.1.

Je vysoce paralelní a přizpůsobitelnou platformou, schopnou zpracování informací a řízení při hardwarových rychlostech. Umožňuje tedy tvorbu specializovaných okruhů, schopných provádět vícero operací za jeden cyklus.^[1]



Obrázek 4.1: Složení FPGA^[1]

Logické bloky se skládají z digitálních komponent jako jsou násobiče, multiplexery (sjednocení více vstupních signálů do 1 výstupu) a převodové tabulky.

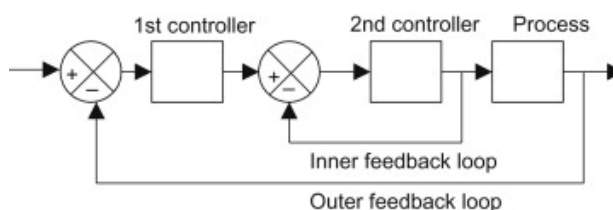
Tyto logické bloky jsou spojeny programovatelnými propojeními, která převádí signál od jednoho logického bloku k druhému. Programovatelná propojení také mohou převádět signál do I/O bloků pro obousměrnou komunikaci s okolními okruhy.

FPGA pracuje při podstatně nižších frekvencích než CPU, ale právě díky paralelnosti, tomu že je hardwarově programované a blízkému propojení s I/O může řešení s FPGA dosahovat vyšších datových průtoků, determinismu (následnosti) a kratších reakčních dob než jakých by mohlo dosáhnout samotné CPU bez FPGA.

To je důležité při návrhu kaskádových kontrolních smyček u autonomních skleníků, kde je čas který uplyne od vstupu do systému do vyhodnocení a vygenerování výstupu zásadní.^[1]

4.4 Kaskádové smyčky

Kaskádová smyčka je kombinace dvou kontrolerů, kde výstup prvního (primárního) kontroleru udává požadovanou hodnotu pro druhý (sekundární) kontroler a zpětná vazba sekundárního kontroleru je umístěna uvnitř smyčky zpětné vazby primárního kontroleru. Tyto smyčky reagují rychleji než jednoduchá smyčka s jedním kontrolerem. Tím lze dosáhnout snížení výkyvů a kmitání systému^[8]



Obrázek 4.2: Schéma kaskádové smyčky^[8]

Uvažujme situaci, kdy je průměr nádoby relativně velký vůči šířce trubky regulovaného průtoku. Tudíž bude docházet jen k pomalým změnám úrovně hladiny i při velkých změnách průtoku, což znamená, že bude docházet k případům, že i když zásadním způsobem změníme průtok přívodu vody, uplyne mnoho času než se změna projeví na úrovni hladiny. Problém je popsán Obr. 4.3.

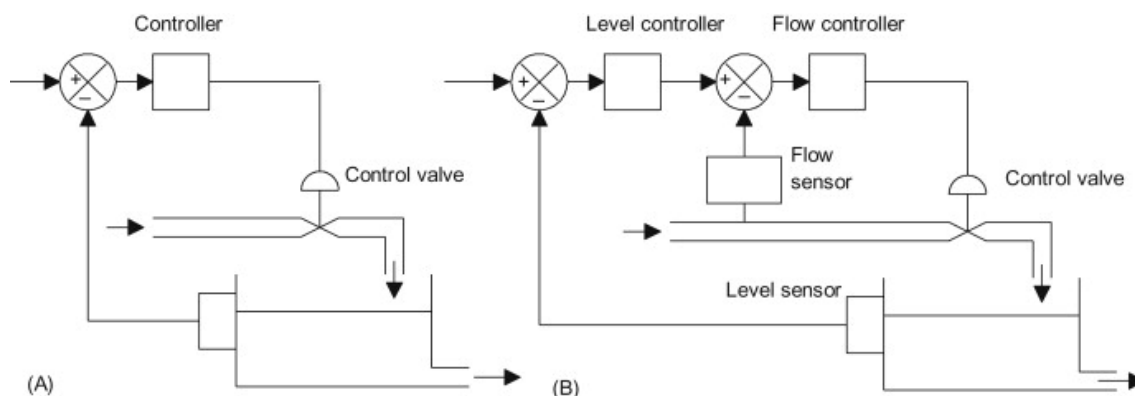
Tento příklad je typově velmi blízký prostředí skleníku, kde proměnné prostředí, jako jsou teplota, vlhkost vzduchu nebo koncentrace oxidu uhličitého také reagují na akce aktuátorů jen velmi pomalu.

(A) případ regulace s jednou regulační smyčkou:

senzor úrovně hladiny posílá odchylku od požadované hodnoty do kontroleru který řídí průtok.

(B) případ regulace s kaskádovou regulací:

senzor úrovně hladiny posílá informace o odchylce do kontroleru vnější smyčky, který následně udává žádanou hodnotu do kontroleru vnitřní smyčky, který ovládá průtok vody. Vnitřní smyčka reaguje rychle na výchyly toku a redukuje míru kolísání která by se vyskytovala v případě (A)^[8]

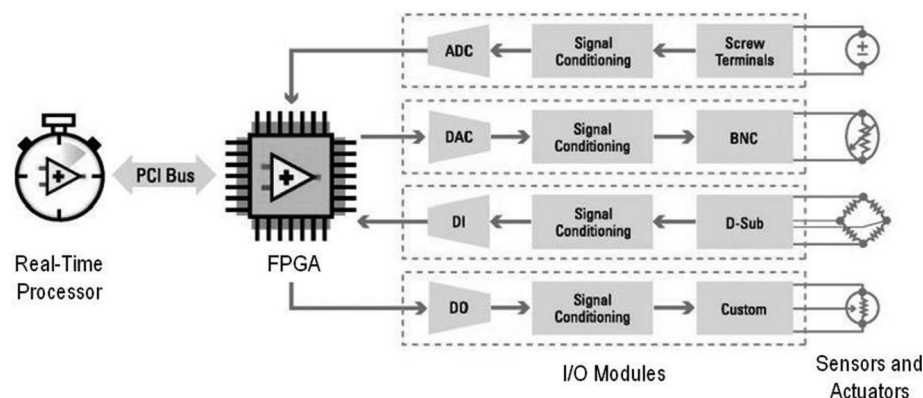


Obrázek 4.3: Příklad kaskádové regulace množství vody v nádrži^[8]

4.5 CompactRIO

CompactRIO je průmyslový embedded system kontroler pro řízení průmyslových systému, obsahující procesor pracující na RTOS, vyměnitelné, konfigurovatelné I/O (input/output) moduly, rekonfigurovatelné FPGA a Ethernet pro komunikaci s ostatními zařízeními. Schéma je zobrazeno v Obr. 4.4.

Procesor nabízí spolehlivé, předvídatelné chování a vyniká ve výpočtech s reálnými čísly a analýze, zatímco FPGA se využívá u jednodušších úkonů, vyžadujících vysoko rychlostní logiku a přesné načasování. Často také obsahuje HMI (human-machine interface), které poskytuje obsluhu grafické prostředí (GUI) informující o stavu autonomního skleníku a umožňující změny v nastavení různých parametrů. LabView může být použito k integraci všech komponent RIO (reconfigurable I/O) do takového zařízení.^[1]



Obrázek 4.4: Architektura embedded systému^[1]

ADC - analog-to-digital converter; DAC - digital-to-analog converter; DI - digital input; DO - digital output; Actuator - zařízení měnící elektrickou energii na jinou formu energie.; Signal conditioning - příprava signálu pro další zpracování

4.6 PID (proportional-integral-derivative)

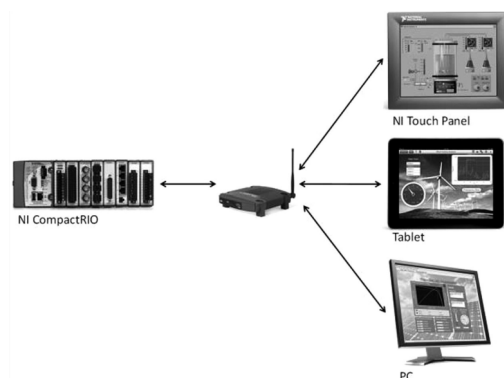
PID kontroler se skládá z proporcionální, integrační a derivační složky. Proporcionální složka přičítá na vstup procesu řídicího výstup násobek aktuální odchylky od požadované hodnoty a integrační složka přičítá plochu pod křivkou vývoje aktuální hodnoty od požadované hodnoty. Toho lze využít například když už je odchylka od požadované hodnoty tak malá, že výstup, např. napětí, z proporcionální složky nestačí na například pohyb servo motoru. Integrační hodnota dostatečné napětí na pohyb po nějaké době nakumuluje, napětí servem pohne a odstraní tyto zbytkové odchylky od požadované hodnoty.

Derivační složka působí proti změně odchylky od požadované hodnoty, tím snižuje překmit. Často, obzvlášť v pomalu reagujících systémech, jako jsou i skleníky, ji lze zanedbat.

4.7 HMI (Human-machine interface)

Nejjednodušší embedded systémy se skládají z jednoho kontroleru provozovaného v head-less (bezhlavé) konfiguraci. Tato konfigurace se používá v případech, kdy není potřeba HMI pro nic kromě diagnostiky a údržby. Avšak, většina ovládacích a monitorujících aplikací vyžaduje HMI pro zobrazování dat operátorovi nebo aby umožnily posílání příkazů do embedded systému na dálku. Běžnou konfigurací je 1:1 (1 host to 1 target), tj. 1 ovládací prvek a 1 cíl. Ovládacím prvkem může být například dotykový panel, tablet nebo počítač. HMI komunikuje s CompactRIO Ethernetem přes přímé připojení, rozbočovač (hub) nebo bezdrátový router.^[1]

Tato konfigurace je užitečná pro základní kontrolu a monitorování skleníku.



Obrázek 4.5: HMI konfigurace 1:1^[1]

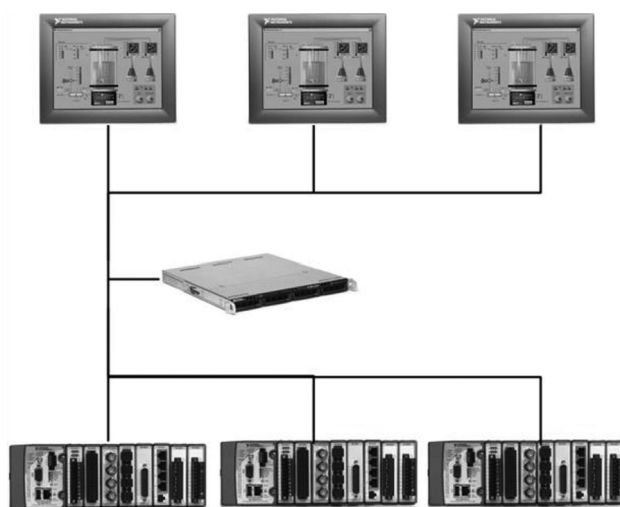
Vyšším stupněm systémové complexity je buď 1:N (1 ovládací prvek, N cílů), nebo N:1 (N ovládacích prvků, 1 cíl). Ovládacím prvkem je zde typicky počítač nebo průmyslový dotykový panel. 1:N konfigurace je typická pro systémy kontrolované lokálním operátorem. N:1 se využívá, pokud je potřeba kontrolovat systém z více lokalit. Komplexní skleníková kontrola může využívat N:N (N ovládacích prvků, N cílů) konfigurace s mnoho kontrolery, často ve spojení s výkonným serverem který zpracovává a dále předává data.^[1]

N:N konfigurace se užívá pro fyzicky velké nebo komplexní skleníky, jelikož N:N umožňuje rozdělení rozmánitých úloh mezi skupinu operátorů pracujících v různých lokalitách.

Kontrola prostředí v běžném komerčním skleníku je založena na heuristickém přístupu (přístupu, který funguje, ale nemusí být optimální) a využívá konfiguraci N:1. Ale existují alternativní metody s lepšími algoritmy, které dosahují lepších výsledků. Konfigurace N:N může pomoci při implementaci těchto algoritmů.

Některé z nich se obtížně implementují protože vyžadují pracné kalibrace fyzických systémů tak, aby odpovídaly modelu v kontroleru.

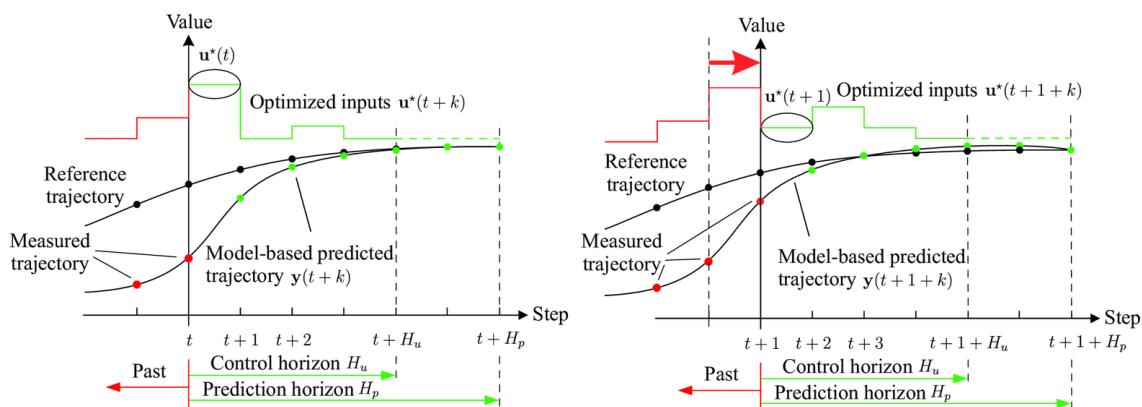
Toto je i případem optimálních kontrolerů RHOC (podmnožina MPC kontrolerů), které musí přesně odpovídat modelu, takže je lepší použít N:N pro lépe odpovídající model.^[1]



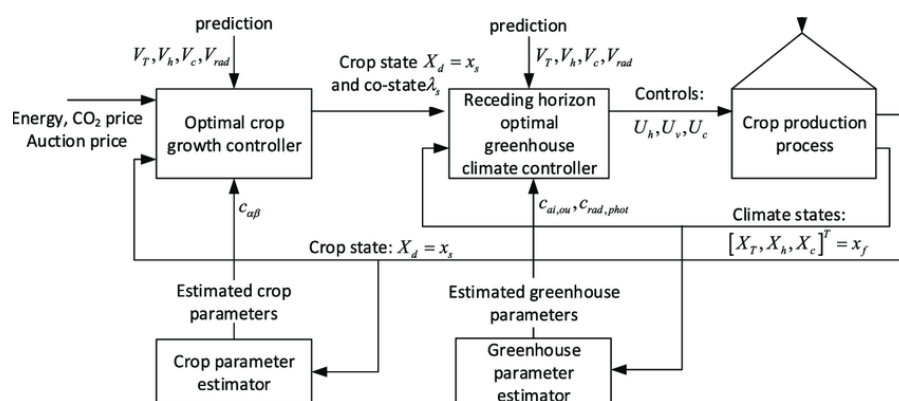
Obrázek 4.6: HMI konfigurace N:N^[1]

4.8 RHOC (Receding horizon optimal control)

U RHOC se v daném čase t a za stavu x_t řeší optimalizace v pevně daném časovém intervalu $[t, t+k]$ s optimální kontrolní sekvencí (sekvence sloužící ke kontrole periferií) $\{u^*(t), \dots, u^*(t+k)\}$, beroucí v potaz současné a budoucí omezení. Následně se aplikuje jen první krok výsledné optimální kontrolní sekvence, určí se stav v čase $t+1$, opakuje se optimalizace v čase $(t+1)$ nyní na budoucím intervalu $[t+1, t+1+k]$, začínající v nyní současném stavu x_{t+1} . H_u je kontrolní horizont, udávající počet optimalizací manipulovaných proměnných (MVs; Manipulated variables, tj. vstupy určené uživatelem nebo kontrolním systémem, za účelem udržení kontrolovaných proměnných na požadovaných hodnotách) na kontrolním intervalu k , který je roven 1 až hodnotě predikčního horizontu H_p , která je rovna počtu budoucích kontrolních intervalů, které musí kontroler vyhodnotit při optimalizaci manipulovaných proměnných na kontrolním intervalu k . Princip lze vidět na Obr. 4.7.^{[9][10][18][20]}



Obrázek 4.7: Princip RHOC^[9]



Obrázek 4.8: Příklad toho, jak by mohl vypadat systém autonomního skleníku využívajícího RHOC^[10]

5 Pokročilá kontrola autonomního skleníku

Pokročilé technologické systémy jsou založené na fuzzy logice a umělé inteligenci realizované například pomocí neuronových sítí.

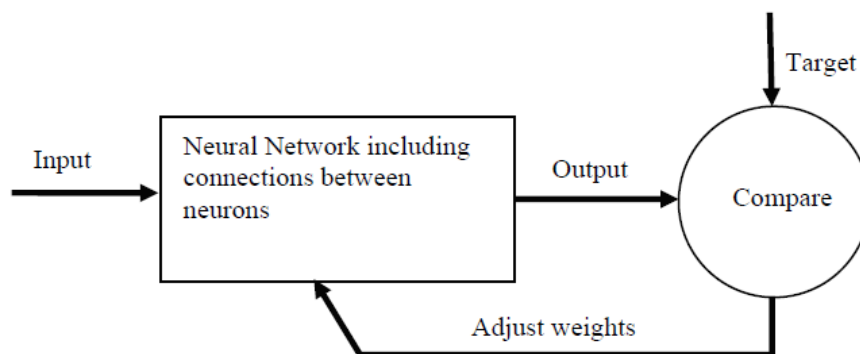
5.1 Neuronová síť

Neuronová síť je paralelní systém zpracování informací, skládající se z množství propojených jednotek organizovaných do vrstev. Tyto jednotky napodobují architekturu mozkových struktur živočichů. Zpracovává vstup na základě vnitřní architektury sítě, následně porovnává výstup s požadovaným výstupem. Na základě jejich odlišnosti upravuje síly (váhy) spojů mezi jednotlivými umělými neurony, čímž se síť trénuje (učí).^{[12][19][17]}

Z neuronových sítí pro aplikace ve sklenících stojí za zmínku konkrétně CMAC (cerebellar model arithmetic compute) pro reálný čas, což je typ neuronové sítě vycházející z funkce části mozku zabývající se asociativní pamětí, Kawatova hierarchická neuronová síť a nebo Psaltisova více vrstvá neuronovou sítí, která je nerekurentní a má ideální topologii pro použití v FPGA v reálném čase.^[1]

Dle [2] lze zhruba 70% všech problémů řešit na 3 vrstvé “backpropagation” neuronové síti.

Logický princip je zřejmý z Obr. 5.1.



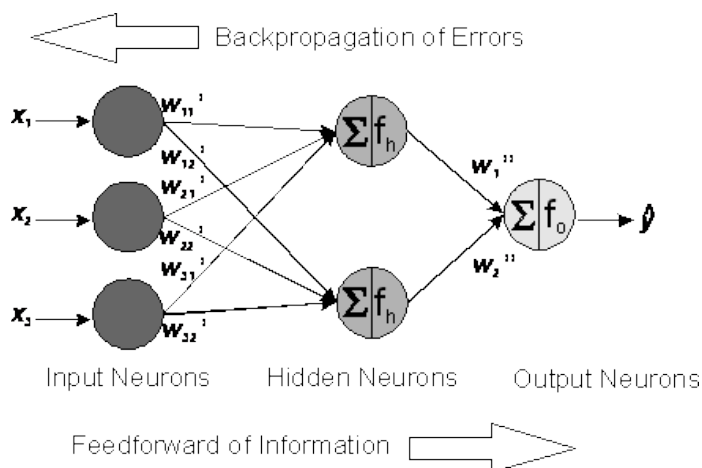
Obrázek 5.1: Logický princip neuronové sítě^[11]

Autoři publikace [3] modelovali parametry prostředí ve skleníku.

V tomto případě je využita 3 vrstvá neuronová síť pro model teploty a relativní vlhkosti, s venkovní teplotou, relativní vlhkostí, rychlostí větru a světelným zářením jako vstupy. Tento model umožňuje předpověď změn ve vnitřním prostředí skleníku na základě vnějšího prostředí. Po vymodelování a vytrénování neuronové sítě tvoří model regulující teplotu a relativní vlhkost ve skleníku.

5.1.1 Backpropagation neuronová síť

Vstupy projdou vrstvami neuronové sítě, čímž dostaneme reálný výstup y . Ten je následně porovnán s požadovaným výstupem y^* , z toho systém zjistí, zda naše neuronová síť produkuje vyšší nebo nižší výstupy než požadované. Na základě této znalosti upraví síly spojů ve vrstvě před výstupem, tak aby hodnoty v dané vrstvě odpovídaly lépe žádanému výstupu (vyšší/nížší). Stejný postup je aplikován i na vrstvě předcházející vrstvě před výstupem a tak dále až k vrstvě před vstupem.^[12] Systém je schématicky vyjádřen na Obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Základní schéma 3 vrstvé backpropagation neuronové sítě^[12]

5.2 Metody pokročilé kontroly autonomních skleníků a práce jimi se zabývající

5.2.1 Fuzzy regulace

Fuzzy regulace se skládá z:

- Fáze vstupu, kde se mapují vstupy ze senzorů na odpovídající členské funkce (membership function; MF; funkce udávající svým tvarem míru splnění daných podmínek (0 až 1)).
- Fáze zpracování vstupu, jenž vyvolává každé z pravidel přiřazených členským funkcím, generuje pro každé výsledek a následně kombinuje výsledky těchto pravidel.
- Fáze výstupu potom konvertuje zkombinované výsledky do konkrétní hodnoty výstupu.^[20]

Shihua Li, Shiyang Liu a Limei Ju v publikaci [4] navrhli adaptivní inteligentní kontrolu skleníku založenou na **Fuzzy regulaci a Observeru**.

Tento systém umožňuje kontrolu nad několika skleníky řízenými centrálním počítačem. Navíc využívá GUI, schopné vykreslit historická data a umožňuje monitorování a řízení parametrů prostředí skleníku.

Množství oxidu uhličitého je regulováno klasickým PID regulátorem, protože časová prodleva dosažení požadované hodnoty je malá a má přiměřenou přesnost. K větším výkyvům hodnot oxidu uhličitého ve skleníku nedochází také proto, že koncentrace oxidu uhličitého v okolí skleníku je přibližně konstantní.

V této publikaci je fuzzy regulace využita ke kontrole teploty a vlhkosti a využívá pěti trojúhelníkových členských funkcí.

Tento konkrétní systém umožňuje kontrolu nad několika skleníky řízenými centrálním počítačem.

Observer

Observer (pozorovatel) je systém, odhadující vnitřní stavy daného reálného systému, na základě hodnot vstupů a výstupů tohoto systému.

Musí být rychlejší než soustava kterou řídí, ale pokud bude o hodně rychlejší, bude řízenou soustavu rozkmitávat. Proto je třeba správně nastavit jeho póly, tj. mírně zápornější než póly řízené soustavy.^[22]

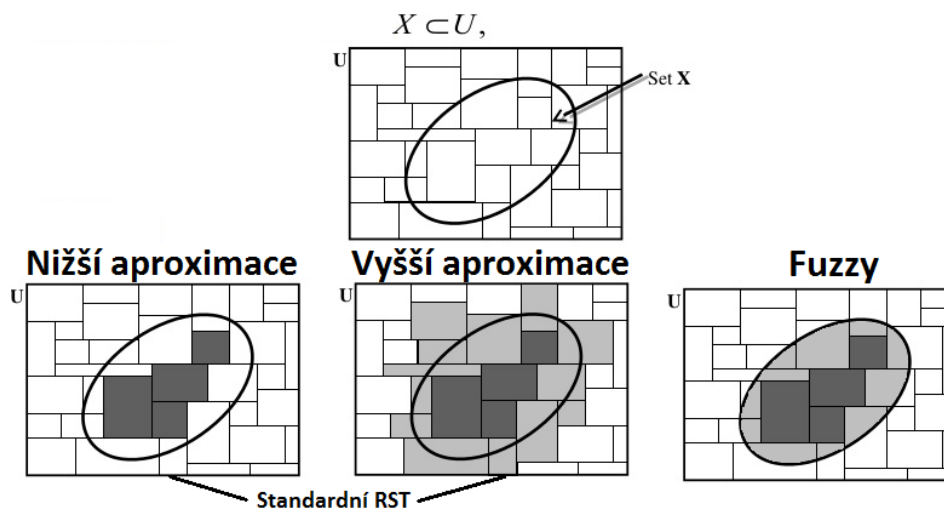
5.2.2 RST (rough sets theory)

RST je metoda aproximace množiny hodnot nezcela spadajících do jedné či druhé typové množiny z množin, do kterých tyto hodnoty chceme zařadit.

Výstupem je dvojice výstupů, z nichž jeden je vyšší a druhý nižší aproximací původní množiny.

Ve standardní RST hodnoty aproximačních množin nabývají hodnot 0 nebo 1 (true/false), v fuzzy logice ale nabývají členy množiny hodnot míry členství funkcí fuzzy regulátoru v intervalu od 0 do 1 v oboru reálných čísel, jak je vidět z Obr. 5.3.^[23]

[24]



Obrázek 5.3: Princip RST^[13]

X. Fang, S. Junqiang and C. Jiaoliao se zabývají v práci [5] fuzzy kontrolou teploty založenou na RST.

Fuzzy kontrola založená na RST

Pro regulaci teploty využívá RST k získání chybějících dat v databázích teplot a poté využívá těchto dat pro generování množiny pravidel následně užívaných v fuzzy regulátoru.

Velkou výhodou takového systému je možnost využití menšího množství vstupních dat vysoké nejistoty bez zásadnějšího zhoršení kvality regulace.

Toto řešení bylo dále zdokonaleno v článku [6], zabývajícím se návrhem optimalizace systému regulace teploty ve skleníku s fuzzy logikou pomocí změny parametrů v členské funkci kontrolního systému s využitím **Genetického algoritmu**.^[1]

Genetický algoritmus

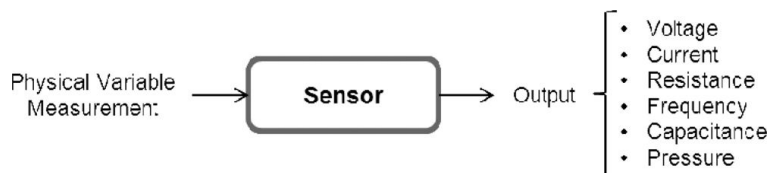
Je to heuristická metoda založená na Darwinově principu přírodního výběru. Na počátku je dána jakási populace, která je náhodně alternována. Úspěšnější z alternací se dále alternují do nových větví, zatímco neúspěšné alternace jsou terminovány. Cyklus výběru se opakuje dokud některý člen populace nedosáhne predefinovaných, cílových atributů.^[25]

6 Senzory pro monitorování skleníku

6.1 Základní popis a rozdělení

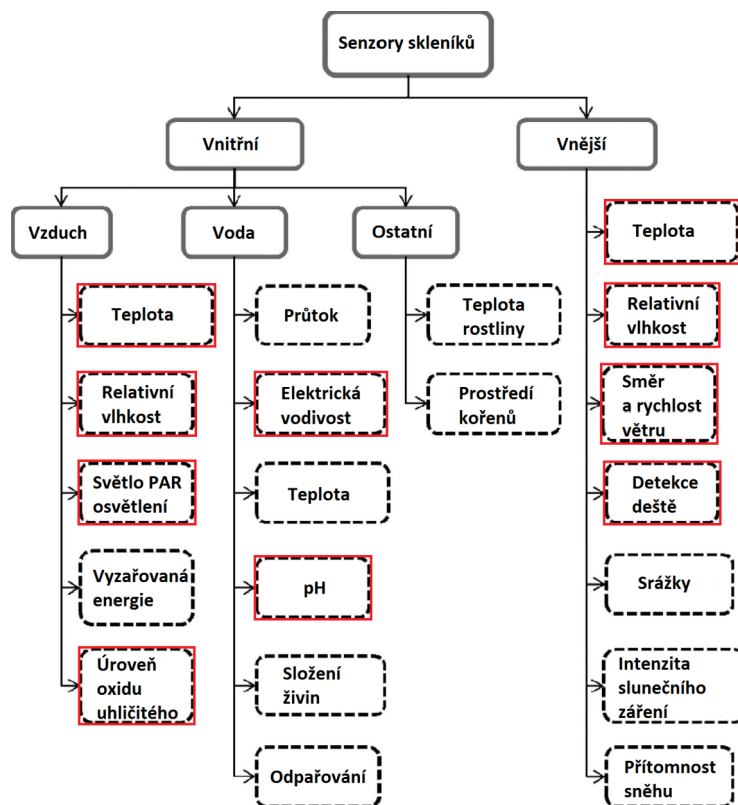
Dříve informace museli získávat a rozhodnutí činit pěstitelé, které lze dnes nahradit senzory a správně navrženým kontrolním systémem, jejichž kombinace může pracovat bez přestání po dlouhou dobu a to v libovolném měřítku.

Senzory jsou zařízení, popisující stavy prostředí elektrickým signálem, viz Obr 6.1. Tento signál se dále zpracovává, nebo slouží jako informace pro operátora. Zpracováním se myslí třeba zesílení, filtrace, vyhlazení signálu nebo redukce šumu. Takto zpracovaný signál je konvertován ADC (analog/digital converter), aby mohl být dále zpracován inteligentní elektronikou. Správná volba senzorů má na řízení skleníku zásadní vliv, jelikož kontrolní systém nemůže činit správná rozhodnutí, pokud nemá adekvátní a správné informace.^[1]



Obrázek 6.1: Funkce senzoru^[1]

Veličiny měřené senzory autonomního skleníku se dělí dle Obrázku 6.2. Nejdůležitější z nich jsou označeny červeným rámečkem.



Obrázek 6.2: Vstupy senzorů autonomního skleníku^[1]

Hodnoty jednotlivých proměnných v různých částech skleníku se mohou lišit, proto je třeba použít více senzorů umístěných v různých částech skleníku pro správnou kontrolu. Množství kabeláže pro takové množství senzorů může působit problémy, proto se čím dál častěji využívá bezdrátových senzorů.

Výstupy ze senzorů lze po zpracování v kontrolních systémech použít pro ovládání různých typů aktuátorových soustav, jako jsou například vytápění, ventilace, zavlažování nebo dávkování rostlinné výživy a oxidu uhličitého, které jsou zásadní pro udržování požadovaných hodnot kontrolovaného prostředí skleníku.^[1]

6.2 Parametry senzorů

Při výběru správného senzoru nebo jejich kombinace, je třeba znát prostředí ve kterém se senzorická soustava nachází, povahu měřené charakteristiky a také její rozsah a velikost. Na jejich základě lze následně vybrat senzor se správnými parametry.^[1]

Citlivost

Popisuje schopnost senzoru dostatečně měnit sílu elektrického signálu produkovaného výstupem senzoru při malých změnách hodnoty měřené veličiny. Citlivost senzorů inteligentních a autonomních skleníků nemusí být nijak obzvlášť vysoká, lze použít senzory běžných citlivostí.^[1]

Rozsah

Udává maximální hodnotu měřené veličiny, kterou je senzor schopem ještě měřit. Měl by být takový, aby byly veškeré hodnoty kterých může veličina na nabýt menší, než rozsah senzoru. Rozsahy hodnot v autonomním skleníku jsou velmi předvídatelné a nijak extrémní, jelikož se jedná o prostředí blízké běžným venkovním podmínkám.^[1]

Charakteristiky elektrického signálu

Charakteristiky signálu musí být kompatibilní se zbytkem měřicího systému. Jedná se například o impedanci, odezvu a frekvenční charakteristiku.^[1]

Provozní chyby

Jsou chyby vznikající na výstupu signálu buď vlivem výrobních vad, nebo vlivem prostředí. Musí být dostatečně malé, aby mohly být zanedbány, nebo předvídatelné, aby je bylo možno kompenzovat. Výrobní chyby, způsobené výrobními vadami, lze odhalit izolováním daného senzoru v prostředí se známou hodnotou veličiny senzorem měřené a porovnáním této známé hodnoty s výstupem senzoru. Pokud se jedná o odchylku popsateľnou funkcí měřené veličiny nebo konstantu, lze ji od měřené hodnoty odečíst a tím chybu kompenzovat, senzor kalibrovat. Senzory je potřeba pravidelně rekalibrovat.^[1]

Prostředí

Může poškodit senzor, pokud není senzor zvolen správně. Senzor musí být volen tak, aby nebyl poškozen při vystavení podmínkám, jimž může při měření čelit. Mezi tyto podmínky patří například vlhkost, teplota nebo látky způsobující korozi či jiné poškození materiálu senzoru.

Skleníky jsou obzvlášť nehostinným prostředím co se týče životnosti senzorů. Je zde vysoká hodnota vlhkosti způsobující velké množství kondenzace, prach, špína a dlouhé doby vystavení slunečnímu záření. Proto lze používat jen senzory certifikované pro taková prostředí.^[1]

6.3 Umístění

Správná volba umístění jednotlivých senzorů je další důležitou součástí správně pracujícího regulačního systému. Vždy nás zajímá hodnota veličiny v místě, kde ji chceme regulovat, proto v autonomních sklenících senzory teploty, vlhkosti a intenzity slunečního záření umísťují do stejné výšky nebo o trochu výš, než do které dosahuje vrchol rostliny.

Tedy například senzory slunečního záření nesmí být stíněny v jiné části dne, než samotné rostliny.

Dále je třeba uvážit zkreslení hodnot měřených senzorem vlivem dalších proměnných.

Teplotní senzory nesmí být vystaveny slunečnímu záření, nacházet se v blízkosti ventilace, zavlažování nebo poblíž elektrické součásti produkující teplo. Senzor vlhkosti by mohl být ovlivněn zavlažovacími systémy, ventilací nebo slunečním zářením.

Senzor CO₂ musí být umístěn dostatečně daleko od ventilace. Senzor elektrické vodivosti a senzor měřící pH musí být ponořeny do závlahové kapaliny rostliny.

Vnější senzory by se měly nacházet poblíž skleníku a ve výšce odpovídající výšce skleníku. Senzory teploty a vlhkosti musí být stíněny.^[1]

7 Aktuátory

Jsou to zařízení, která vykonávají dané úkony přeměnou elektrické energie na jinou formu energie, za účelem dosažení určitého cíle.

Hlavními aktuátorovými soustavami autonomního skleníku jsou zavlažovací, topné, chladicí a ventilační systémy.

Součástí zavlažovacích systémů mohou být také hydroponické systémy.^[1]

7.1 Ventilace a aktivní chlazení

Ventilace je formou **pasivního chlazení**. Jedná se o proces, při kterém je umožněno vzduchu z vnitřního prostředí skleníku a vzduchu z okolí volně se mísit.

Důležitost ventilace plyne z nutnosti redukce teploty, doplnění CO₂ nebo regulace vlhkosti vzduchu uvnitř skleníku.

Lze využít efektu závislosti hustoty plynu na jeho teplotě a chování tekutin rozdílných hustot v silovém poli. Díky tomu teplý vzduch stoupá vzhůru, odkud může volně unikat, což uvolní prostor pro vstupující chladnější vzduch z níže umístěných otvorů. Přírozené proudění teplého vzduchu vzhůru a nasáváním studeného vzduchu ze stran se nazývá komínový efekt. Na otvory odvodu a přívodu vzduchu se umísťují větráky, za účelem urychlení výměny vzduchu. Otáčky těchto větráků a uzavírání/otvírání větracích otvorů dle potřeby lze automatizovat. Výhodou pasivní chlazení je malá spotřeba energie. Ovšem není schopno udržovat vnitřní teplotu na teplotě nižší než je teplota vnějšího okolí.

Proto je nutné ve sklenících s plodinami vyžadujícími nižší teploty nebo v prostředích s vnějšími teplotami nevýrazně nižšími či dokonce vyššími než je ideální teplota pro danou plodinu v závislosti na ročním období použít **aktivní chlazení**.^[1]

Systémy aktivního chlazení použitých ve sklenících jsou v zásadě založeny na využití principu výparného tepla, což je princip využívající faktu, že při změně skupenství kapaliny z kapalného skupenství na plynné je třeba dodat kapalině skupenské teplo, k čemuž se v tomto případě využije část tepelné energie okolního vzduchu, čímž dojde k jeho ochlazení.

7.1.1 Ve skleníku nejčastěji využitě aktivní chladicí systémy

Fan-and-pad chlazení

Skládá se z ventilátorů foukajících vzduch směrem ven ze skleníku na jedné straně skleníku a porézní vrstvy skrz kterou je čerpána voda na druhé straně. Porézní podložka je v kontaktu s vnějším prostředím. Pokud jsou všechny otvory vyjímaje tyto větráky a otvor na jenz je přiložena porézní podložka uzavřeny, vzduch musí do skleníku vstupovat přes porézní podložku. Z podložky se při proudění vzduchu odpařuje voda, čímž je tento do skleníku vstupující vzduch ochlazován. Jak ochlazený vzduch prochází skleníkem, je ohříván prostředím. To vede k nežádoucím rozdílům teplot naskrz skleníkem. Silnější větráky nebo jejich menší vzdálenost od evaporační podložky tento rozdíl redukuje.

Chladicí výkon tohoto řešení lze měnit především změnami otáček ventilátorů.^[27]

Mlhový chladicí systém

Jedná se o disperzní výparný systém. Z principu kubické závislosti objemu a kvadratické závislosti plochy kapky na poloměru plyne, že pro dané množství vody lze maximalizovat výparnou plochu disperzí na co nejmenší kapky.

Voda je proto rozprašována pomocí mlhových trysek, čímž se do vzduchu uvolňuje velké množství malých kapek vody, jevících se jako mlha. Kapky se následně vypařují a ochlazují okolí. Vzduch je opět hnán naskrz skleníkem, ale je potřeba zhruba jen poloviční sací výkon v porovnání s ***fan-and-pad chlazením***. Tentokrát je využito jak větráků foukajících vzduch do skleníku, tak i větráků foukajících vzduch ven.

Jedna trubice se sérií mlhových trysek je umístěna přímo za vstupní větráky foukající vzduch do skleníku, další potom dále od nich. Trubky dále od vstupu vzduchu mají za úkol snižovat rozdíly teplot naskrz skleníkem.

Míru chlazení mlhového chladicího systému lze měnit nastavením jeho aktivního času, tj. změnou délky či frekvence sekvencí distribuce vody.^[1]

Chlazení konvekční trubkou

I v průběhu zimy může docházet ke vzniku příliš vysokých teplot uvnitř skleníku vlivem slunečního záření. Na rozdíl od předešlých dvou řešení, chlazení konvekční trubkou je systém navržený tak, aby pracoval v době kdy je venkovní teplota velmi nízká.

Systém se skládá z ventilátoru, vyfukujícího vzduch ven ze skleníku, který vytváří ve skleníku podtlak, uzavíratelného otvoru umístěného v horní části kratší stěny skleníku a tlakového ventilátoru, upevněného k trubce s otvory. Tlakový ventilátor je umístěn přibližně 0.5m od uzavíratelného otvoru. Jeho účelem je nasávat studený vzduch vstupující do skleníku uzavíratelným otvorem a čerpat ho do trubky s menšími otvory. Studený vzduch proudící trubicou, která vede od tlakového ventilátoru až k protější stěně skleníku, je vytlačován tlakem způsobeným ventilátorem ven z trubky.

Rychle z trubky proudící vzduch se víří a mísí s teplejším vzduchem vnitřního prostředí vysoko nad úrovní rostlin, což je pro rostliny šetrnější než nárazové změny teplot ke kterým může docházet vlivem proudění vzduchu u jiných chladících řešení.

Za běžných podmínek je takový systém navrhován pro taková prostředí, kde se teplota vnitřního vzduchu má lišit maximálně o 8°C od teploty vnějšího prostředí.

Chladicí výkon lze měnit především změnou náklonu žaluzií kryjících vstup vzduchu, popřípadě změnou otáček výstupního ventilátoru.^[1]

Vodorovné chlazení vzduchem (HAF; horizontal airflow cooling)

Jedná se o systém ventilátorů umístěných tak, aby proudění generovaná jednotlivými ventilátory na sebe navzájem navazovala a tvořila smyčky.

Na čele skleníku se nachází uzavíratelný vstup, ve formě žaluzií jejíž náklon lze měnit.

Tímto vstupem do skleníku vstupuje studený vzduch, který je zachycován smyčkami proudění ve skleníku jež generují větráky. Rychlosti proudění se pohybují od 0.25ms⁻¹ do 0.5ms⁻¹. Mimo chladicí efekt je tento systém také užitečný pro rovnoměrnou distribuci CO₂ a vlhkosti v prostoru skleníku.

Chladicí výkon tohoto systému lze měnit změnami náklonu žaluzií kryjících vstup.^{[26][1]}

7.2 Topné systémy

Vytápění je potřeba, pokud není teplo vnějšího prostředí a teplo přijímané ve formě slunečního záření dostatečné pro udržení požadované teploty ve skleníku. K tomu může docházet nejen v chladnějších měsících roku, ale i v průběhu noci.

Topný systém musí být schopen produkovat množství tepla minimálně ekvivalentní ztrátám skleníku vlivem tepelné vodivosti, radiačním ztrátám a ztrátám způsobeným netěsnostmi skleníků vedoucích k výměně vzduchu vnitřního a vnějšího prostředí.

7.2.1 Ve skleníku nejčastěji využité topné systémy

Topné jednotky

Skládají se z ohniště (fireboxu), trubkového výměníku tepla a tepelné distribuce ve formě větráku.

V ohništi je spalován plyn, palivový olej nebo jiná paliva, čímž vzniká značné množství tepla. Zahřáté spaliny odcházejí trubkovým výměníkem tepla vedoucím k vrcholu skleníku, kde opouští skleník, nebo jsou vypouštěny přímo do prostoru skleníku.

U prvního z případů sice dochází při vedení spalin teplovodivými trubkami k přechodu značného množství tepla do prostoru skleníku, ale část tepla zůstává nevyužita a je vypouštěna do prostoru mimo skleník. Druhý z případů může být aplikován pouze pro určité typy nízkoplodinových paliv, ale dosahuje vyšší topné efektivity. Větrák čerpá přes trubkový výměník vzduch, čímž zvyšuje míru jeho ochlazování a tím i množství tepla, které může přejít do skleníku.

Množství spalovaného paliva, a tím i výhřevnost každé topné jednotky může být měněna. Rychlost ventilátoru se odvíjí od množství tepla produkovaného v ohništi.^{[28][1]}

Centrální vytápění

Jeho částmi jsou centrální boiler, který produkuje horkou vodu nebo páru, a systém distribuující teplo do prostor skleníku.

Voda nebo pára z boileru putuje trubkami které vedou naskrz skleníkem. Tento systém je velmi podobný vytápění většiny domácností.

Topný výkon se nastavuje mírou ohřátí vody nebo páry v boileru, které se odvíjejí od množství elektrické energie či plynu použité v boileru k jejich ohřátí.^[1]

Sálavé vytápění

Boiler, nebo jiná topná jednotka, žene médium, nejčastěji páru nebo vodu, trubkami, které se nacházejí v blízkosti rostlin.

Zahřáté trubky vyzařují teplo přímo na rostliny, což umožňuje provoz skleníku při nižších teplotách vzduchu, jelikož rostliny a substrát mohou být tímto způsobem zahřívány přímo. Tím dochází k úsporám energie.

Topný výkon se nastavuje mírou ohřátí vody nebo páry topnou jednotkou, které se odvíjejí od množství elektrické energie či plynu použité v boileru k jejich ohřátí.

Zahřátá trubka může zároveň sloužit jako kolejnice pro rameno vykonávající další úkony na rostlinách.^{[29][1]}

7.3 Zavlažovací systémy

Účelem zavlažovacího systému je distribuce vody ve skleníku tam, kde a kdy je potřeba. Množství potřebné vody se odvíjí od faktorů jako je zavlažovaná plocha, prostředí kořenů, individuální požadavky rostliny v dané růstové fázi, podmínky mimo skleník, nebo zda jsou aktivní systémy snižující vlhkost v prostoru skleníku, jako jsou topné a ventilační systémy. Příliš vysoké množství vody kromě finančních ztrát způsobuje snížení kvality produkovaných plodin, zvyšuje rizika plísní, v extrémních případech i hnutí kořenů a úhyn rostlin. Náchylné na špatné dávkování vody jsou obzvláště rostliny s mělkými kořeny, jako je většina typů zeleniny.^[1]

Zavlažování skleníku lze rozdělit na podle typu prostředí kořenů na:

- **Substrátové**
- **Hydroponní**

7.3.1 Nejčastější zavlažovací systémy pro substrátovéskleníky

Obvodové zavlažování

Skládá se z potrubí s tryskami umístěného z obou stran podélných nádob v nichž jsou umístěny rostliny. Potrubí je umístěno tak, aby trysky distribuovali vodu pod listy rostlin a zároveň trysky protilehlých trubek byly od sebe navzájem posunuty o polovinu vzdálenosti mezi dvěma tryskami na trubce.

Množství vody distribuované do skleníku lze regulovat změnami délek a četností zavlažovacích cyklů.^[1]

Kanálové zavlažování

Voda je vedena hlavním kanálem, jenž je napojen na sérii menších kanálů které vedou k sériím rostlin umístěných v vodu propouštějících nádobách.

Kanály jsou často nahrazeny hadicemi nebo potrubím a místo kanálů vedoucích podél sérií rostlin jsou užity hadice/trubky většího průměru, které jsou napojeny na velké množství hadic/trubek velmi malých průměrů, jež vedou k jednotlivým rostlinám.

Množství vody lze nastavit změnami délek a četností zavlažovacích cyklů.^[1]

Pramínkové a kapkové systémy

Přívod vody je napojen na filtrační zařízení, skrz které voda proudí do hadice, případně trubky, která se následně dělí na množství tenkých porézních trubic, perforovaných trubic malých průměrů, mikro trubic napojených na hlavní hadici nebo menší hadice z ní vedoucích, které vedou malé množství vody přímo ke kořenům individuálních rostlin. Účinné filtrační zařízení je nutností aby nedocházelo k rychlému ucpání velmi tenkých částí vedoucích vodu k individuálním rostlinám. I s použitím filtru má tento systém poměrně krátkou životnost, díky tenkým, měkkým součástem a množství malých otvorů, které se lehce ucpou. Zároveň je jedním z dražších systémů. Na druhou stranu má z uvedených systémů nejnižší spotřebu vody a skleníky využívající tento systém dosahují nejvyšších sklizní.

Nastavení probíhá nastavením trvání a frekvence zavlažovacích cyklů.^[1]

Výložníkové zavlažování

Je složeno z série trysek umístěné na liště, která je umístěna kolmo ke kolejnici jež vede naskrz skleníkem. Lišta s tryskami se na této kolejnici pohybuje pomocí elektrického motoru z jedné strany skleníku na druhou. V průběhu tohoto přesunu je do trysek pumpována voda.

Na rozdíl od předešlých řešení bývá pro tento případ množství vody dodávané rostlinám regulováno namísto délky cyklu rychlostí pohybu lišty na kolejnici, tzn. že záleží na velikosti výkonu dodávaném elektromotoru pohybového mechanismu.

Existuje i verze výložníkového zavlažování, kde se lišta zastavuje nad sériemi rostlin, v níž jsou rostliny rozmístěny ve vzdálenosti ekvivalentní vzdálenosti trysek na liště.

U této verze se lišta zastavuje nad jednotlivými řadami rostlin a voda není uvolňována konstantně, ale nárazově po dobu pobytu lišty nad danou sérií rostlin. V tomto případě by mohl být systém regulován jako předešlé systémy, s tím rozdílem že kromě četnosti posunu lišty z jedné strany skleníku na druhou je nutno regulovat délku pobytu lišty nad danou sérií rostlin, nikoli celkovou délku zavlažovacího cyklu. Navigaci lišty na pozici odpovídající sérii rostlin by nemusela být nijak zvlášť přesná a lze ji realizovat i jednoduchou regulací, jako je P nebo PI regulace bez překmitu s danou tolerancí odchylky od přesné pozice, tj. při dostatečně malé odchylce od pozice osy určené středy rostlin v dané sérii se aktivuje zavlažování, i pokud nebylo osy dosaženo. Po uplynutí doby nárazového zavlažování se přívod vody vypne a lišta se začne přesouvat k další ose. Pozice os sérií rostlin jsou systému známy.^[1]

7.3.2 Hydroponie

Hydroponie je metoda pěstování rostlin v kapalných výživových roztocích. Do těchto výživových roztoků mohou být umístěny podpory pro uchycení kořenů.

V autonomních sklenících se často využívá hydroponie, jelikož na rozdíl od substrátových prostředí kořenů je možné měnit vlastnosti prostředí kořenů v čase. Výživa je z velké části tvořena u většiny rostlin dusíkem, draslíkem a fosforem. Dalšími silně zastoupenými složkami jsou hořčík, vápník a síra. V malých množstvích pak měď, železo, zinek, bor, molybden, mangan a chlór. V substrátových prostředích se tyto prvky přirozeně vyskytují, případně je lze doplňovat hnojivy. V hydroponím roztoku je zapotřebí zastoupit všechny ze zmíněných prvků, i když některé jen ve stopových množstvích.

Při pěstování v hydroponích roztocích je dosahováno vyšších úrod a menších ztrát vody v porovnání s substrátovými kořenovými médii. V tomto systému také nedochází k usazování solí z vody v půdě, což bývá častým problémem izolovaných půdních prostředí, která jsou zavlažována nedokonale filtrovanou vodou, v níž je rozpuštěno malé množství solí.

Nevýhodami jsou vysoká energetická náročnost, vysoké pořizovací náklady, náchylnost k rychlému zhoršení vlastností prostředí a následné poškození rostlin při nesprávné regulaci nebo vnějšímu zásahu do systému, za který by nebyla regulace schopna kompenzovat.

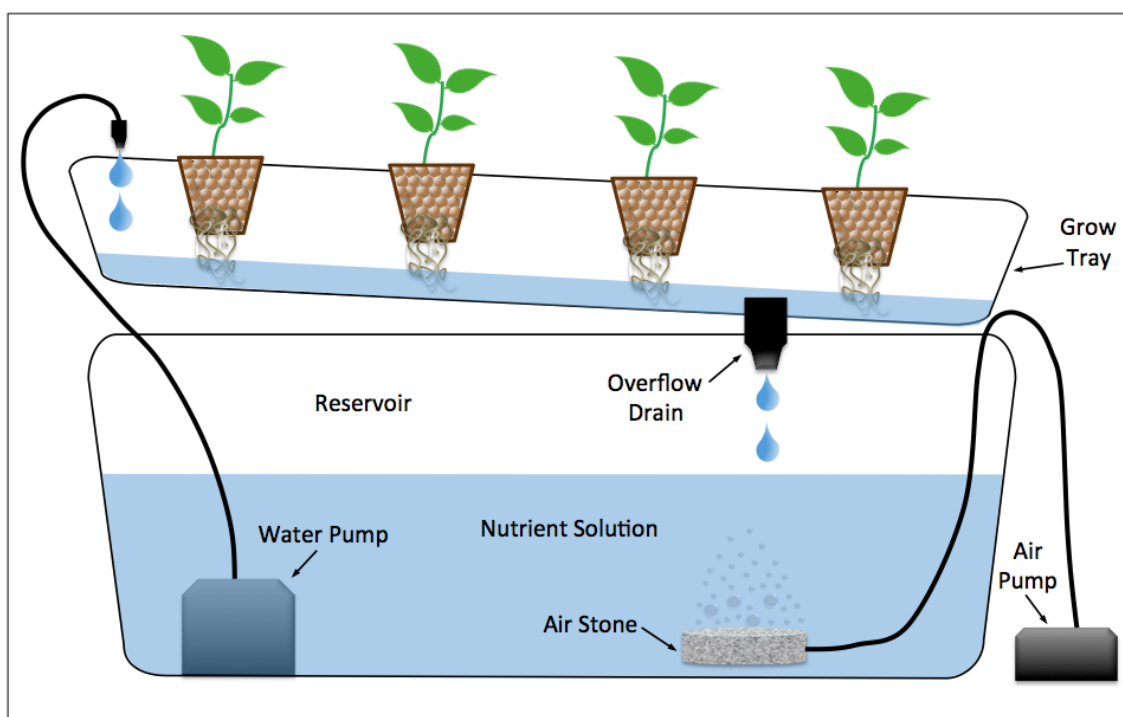
Ke zjištění aktuálního složení hydroponního roztoku na nějž regulace složení reaguje je využíváno například změn jeho elektrické vodivosti v závislosti na množství živin, solí a nečistot.^{[1][14]}

NFT - Technika nutričního filmu

NFT je hydroponickým řešením, v němž dochází k cirkulaci vody mezi nakloněným, úzkým kanálem, do nějž zasahují kořeny rostlin, a nádrží s výživovým roztokem.

Úzkým kanálem z elastického materiálu proudí výživový roztok kolem kořenů rostlin. Vlivem náklonu kanálu roztok volně ztéká z jedné strany kanálu na druhou a následně do zásobníku, v němž je opět obohacen o živiny a ovzdušněn. Ze zásobníku je roztok čerpán do výše umístěného konce kanálu. Princip lze vidět na Obr. 7.1.

Díky malé ploše kanálu dochází jen k minimálním ztrátám vody odpařováním a roztok je vystaven téměř nulovému množství slunečního záření, které by jinak mohlo způsobovat změny jeho chemických vlastností nebo růst řas. Další výhodou této metody je potřeba jen malého množství výživového roztoku, což zjednodušuje udržování jeho správné teploty a chemického složení. ^{[1][14]}



Obrázek 7.1: NFT systém^[14]

8 Soutěže v návrhu umělé inteligence pro pěstování určené plodiny

8.1 Základní specifika

Smysl

Smyslem je hledání nových řešení, nebo zdokonalení již existujících principů aplikovatelných v technologii autonomních skleníků. Doposud se studie zaměřovaly jen na vybraný set parametrů, jenž měly algoritmy řídit. V této soutěži se ovšem hodnotí výsledek komplexně, pomocí skóre skládajícího se z jak ekonomických, tak technických složek celého provozu skleníku.

Lokalita a pořadatelé

Tencent ve spolupráci s Wageningenskou univerzitou uspořádali v Nizozemsku první soutěž tohoto typu, s okurkou jakožto pěstovanou plodinou. Soutěž probíhala v pěti autonomních sklenících řízených na dálku.

Tencent soutěž z velké části financoval zatímco Wageningenská univerzita soutěž organizovala, analyzovala data a poskytla 5 autonomních a 1 běžný skleník. Následující se text bude zabývat právě touto soutěží.^{[15][19]}

Týmy a společnosti

Soutěže se zúčastnilo 5 týmů, vybraných na základě 24 hodinového předkola probíhajícím na virtuálním modelu skleníku. Týmy byly AiCu, DeepGreens, iGrow, Sonoma a theCroperators.

Do soutěžních týmů se zapojili mimo doktoranských studentů mnoha univerzit z mnoha zemí i experti z firem jako jsou Tencent, Microsoft nebo Intel.

Zájem technologických gigantů plyne z pravděpodobného budoucího nárůstu podílu autonomních skleníků a s nimi spojenými technologiemi, jejichž prodej může vést k vysokým ziskům.

Všechny týmy využívaly DL (deep learning) neuronových sítí, tj. neuronových sítí s více než jednou vrstvou mezi vrstvou vstupu a výstupu, pro zdokonalení jejich algoritmů.

Pro porovnání byl jeden skleník ve stejné lokalitě využíván profesionálními Nizozemskými pěstiteli okurek - Growers.^{[15][19]}

Cíl soutěže

Cílem této první soutěže, probíhající mezi srpnem a prosincem roku 2018, bylo vyvinout algoritmus umělé inteligence pro vzdálenou kontrolu skleníku, takový, aby ve skleníku řízeném tímto algoritmem bylo dosaženo co možná nejvyšších výnosů, produkce, nejlepší ekologie, funkčnosti, robustnosti a škálovatelnosti systému. Prodejní cena okurek se odvíjela od jejich kvality.

Vyvinutý algoritmus by měl sám řídit klima skleníku a zavlažování skleníku pomocí setpointů (hodnot kterých má systém dosáhnout), následně pak vydávat instrukce pro zastřihávání a sklíně rostlin konaných nečetným personálem.

Práce personálu byla při výsledném hodnocení započtena do výdajů.^{[15][19]}

8.2 Součásti autonomních skleníků univerzity Wageningen

Senzorický aparát

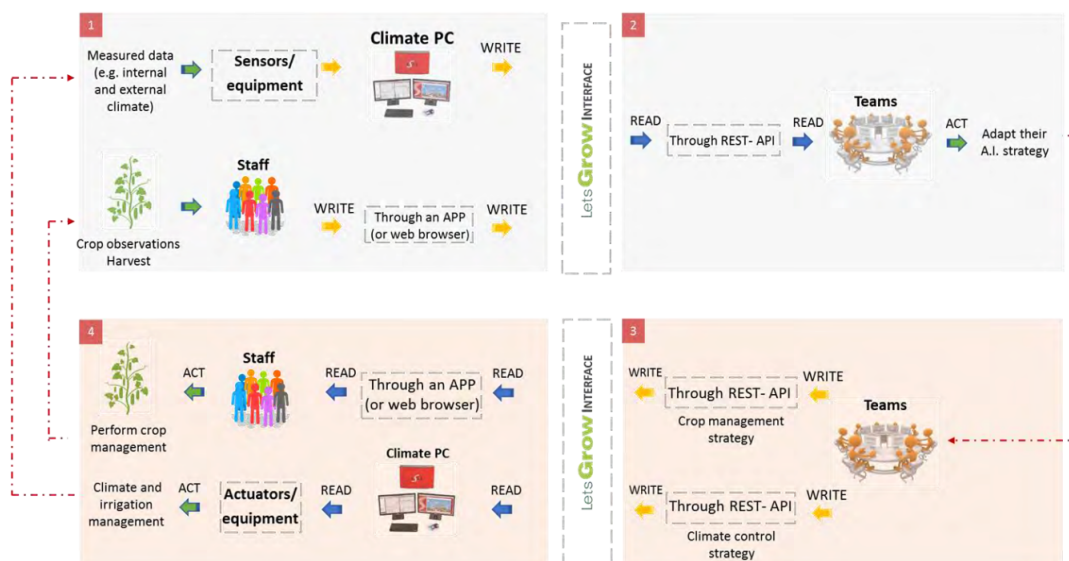
- Tepelná čidla
- Senzory vlhkosti vzduchu
- Senzor CO₂
- Senzor pH a elektrické konduktivity kapaliny
- Meteorologická stanice vně skleníkového komplexu
- Týmům bylo umožněno instalovat i vlastní senzory ^{[15][19]}

Aktuátory

- Střešní ventilační systém
- Sálavé vytápění - trubky v úrovni rostlin a kolejnicový systém na podlaze
- Systém ohřevu závlahové vody
- Mlhový systém
- Zdroj a dávkovač CO₂
- Umělé osvětlení (HPS osvětlení - high pressure sodium light)
- Kapkový zavlažovací systém
- Pohyblivé, světlo rozptylující filtry (rozptylují světlo vstupující do skleníku)
- Pohyblivé, světlo odrážející filtry (v noci odráží umělé záření zpět do skl.) ^{[19][30]}

Popis další konstrukce

- Sazenice okurek jsou upevněné v krychlich substrátu z kamenné vlny (Rockwool slab), ke kořenům pod těmito deskami byly zavedeny hadičky kapkového zavlažovacího systému.
- Uspořádání typu substrátová krychle-sazenice-hadička, byly rozmístěny do zavěšených kanálů v sedmi řadách, které distribuovali případné přebytky vody z jedné substrátové krychle k dalším krychlím.
- Hustota osazení rostlin byla volena jednotlivými týmy před začátkem soutěže. ^[19]



Obrázek 8.1: Schéma operační architektury použitých skleníků ^[15]

8.3 Řízení

Všechny soutěžní týmy byly schopny dálkového řízení všech aktuátorů pomocí jimi vyvinuté řídicí umělé inteligence.

Hlavními setpointy, které mohli soutěžící využít byly:

- Minimální teploty různých částí konstrukce skleníku (°C)
- Vlhkost vzduchu (g/m^3)
- Koncentrace CO_2 (%)
- Míra otevření poklopu ventilace (%)
- Čas mezi posledním a dalším zavlažovacím cyklem (min)
- Umělé osvětlení (vypnuto/zapnuto)^[19]

Z těchto údajů byly počítány další hodnoty jako jsou spotřeba energie, vody a množství produkovaného tepla.

Komunikace setpointů do centrálního počítače kontroly klimatu probíhala pomocí digitálního rozhraní LetsGrow.com. Tento počítač následně posílal příkazy do aktuátorů. Změna nutričního složení prostředí kořenů mohla proběhnout jen jednou za 14 dní na základě analýzy zbytkové vody v zavěšených kanálech. Mohlo docházet k cíleným úpravám elektrické vodivosti, pH a chemického složení. Vzniklá směs byla připravena pomocí speciální jednotky a uložena do zásobníku, z něhož byl napájen kapkový zavlažovací systém.

Prevence škůdců byla v soutěži zanedbána pro zjednodušení.^[19]

8.4 Princip protichůdných efektivit pěstování

Cílem kontroly klimatu je nalézt optimální balanc energetické efektivity a plošné efektivity skleníku. Ty se odvíjejí od komponent prostředí, hustoty stonků, plochy listů a načasování sklizně.

Pro vysokou energetickou efektivitou je nutné, aby byl zlomek CO_2 spotřebovaného při tvorbě fotosyntetických produktů, které skončí v plodech co nejvyšší, při co nejmenším použití umělého osvětlení a vytápění, tj. nejnižší spotřebě energie.

Nejvyšší plošné efektivity lze dosáhnout co možná nejhustším osazením skleníku. Zvýšením hustoty osazení lze množství plodů sice zvýšit, ale je třeba uvažovat, že je třeba zároveň navýšit i fotosyntetickou kapacitu na osazenou plochu. V případě nedostatečného navýšení osvětlení, CO_2 , nebo v případě že se rostliny budou navzájem stínit, začne docházet k zásadním úhynům plodů, jelikož rostliny nebudou mít dostatek fotosyntetických produktů na výživu všech z plodů.

Je třeba si uvědomit, že veškeré záření, energie a CO_2 použité při růstu plodů, které později odumřou, jsou ztrátové a mohou zásadním způsobem ovlivnit energetickou i ekonomickou efektivitou zařízení.

V případě osazení skleníku v nižší hustotě, než by byl skleník schopen uživit, dochází ke snížení efektivity jak plochy skleníku, tj. efektivního zúročení pořizovacích nákladů, tak také efektivita vytápění, jelikož energetické nároky na vytápění skleníku se odvíjí především od velikosti, izolace a ventilace skleníku, nikoli množství rostlin v něm.

To znamená že spotřebují v podstatě stejné množství energie na vytápění skleníku libovolné hustoty osazení.^[19]

8.5 Umělá inteligence a modely

Každý z týmů vyvinul vlastní umělou inteligenci pro řízení skleníku založenou na strojovém učení, což je metoda využití algoritmů a statistických modelů jež počítač využívá pro vykonávání úkonů, spoléhajíc se na opakující se jevy a zásahy, aniž by potřeboval explicitní instrukce.

Každá umělá inteligence založená na strojovém učení musí být vytrénována, než začne být funkční. Jelikož sety dat které byly k dispozici nebyly adekvátních pro danou aplikaci, bylo nutno využít umělý set.

Umělý datový set byl vytvořen pomocí modelu dynamického klimatu skleníku KASPRO a modelu pro růst okurek INTKAM. Tento set byl poskytnut všem soutěžícím před zahájením soutěže.

Model vzniklý na základě KASPRO a INTKAM předpokládá dostatečný přísun vody a živin, ale není schopen simulovat přítomnost škůdců nebo chorob.

KASPRO počítá vnitřní klima skleníku jako funkci nastavení kontroly vnitřního prostředí a podmínek vně skleníku. Je vstupem modelu INTKAM, který počítá hrubé denní množství fotosyntézy jako sumu tempa fotosyntézy v jednotlivých hodinách v průběhu dne, které je počítáno na základě intenzity světla, teploty, koncentrace CO₂ a vlhkosti vzduchu v kombinaci s dynamicky simulovanou architekturou rostliny, obzvlášť pak plochou listů, která má zásadní vliv na množství rostlinou vstřebaných jmenovaných proměnných. Na základě množství fotosyntézy je kalkulován hmotnostní přírůstek rostliny, jenž je rozdělen mezi listy, stonek, kořeny a plod. Čas sklizně se mimo jiné odvíjí hlavně od hmotnosti plodu.

Průměrná doba růstu plodu se pohybovala přibližně mezi 13 a 22 dny v závislosti na přístupu týmu, konkrétně na zvolené teplotě ve skleníku. Vyšší teplota znamená kratší dobu růstu.^[19]

8.6 Přístupy jednotlivých týmů

Croperators

Hustota osazení: 3.2 sazenice/m²

Umělá inteligence navýšila množství světla po asi měsíci růstu, ale kvůli nedostatečné adaptaci hladiny CO₂ ve skleníku bez většího efektu.

Tým volil vysokou míru zastříhávání rostlin, což snížilo plochu pro vstřebávání světla a CO₂ z čehož vyplynula neschopnost rostliny vyživovat všechny plody. To způsobilo úhyn zhruba 30% ze všech uhynulých plodů, kterých bylo celkem asi 18%.

Vlivem vysoké vlhkosti se v tomto skleníku vyskytla plísňová choroba, jejíž výskyt musel být řešen zvýšením míry ventilace. To způsobilo vysoké tepelné ztráty a tím i nutnost vyššího vytápění.

Kvůli nedostatečnému zásobení CO₂ a příliš vysoké vlhkosti, jež způsobila výskyt plísní, který měl za důsledek vyšší spotřebu energie, získali o 18.8% horší skóre oproti referenčnímu skleníku.^[19]

AiCu

Hustota osazení: 3.6 sazenice/m²

Volba nízké teploty a nízké množství světla, ale zároveň ze všech týmů nejvyšší hustota osazení.

Důsledkem bylo nedostatečné množství fotosyntézy vykonávané rostlinami, a s ním spojený úhyn více než 35% všech plodů.

Vlivem špatného přístupu dosáhli o 23.7% horšího skóre než referenční skleník.^[19]

iGrow

Hustota osazení: 2.6 sazenice/m²

Přístup algoritmu týmu iGrow byl velmi podobný přístupu AiCu, iGrow ovšem osadili skleník podstatně menším množstvím sazenic, a proto nedocházelo k tak zásadním, i když stále vysokým úhynům plodů, a to asi 24%.

Nakonec dosáhli druhého nejlepšího výsledku, a to o 5.4% nižšího skóre než referenční skleník.^[19]

DeepGreens

Hustota osazení: 2.6 sazenice/m²

Algoritmus vytvořil velmi vysoké teploty ve skleníku ve spojení s vysokou mírou využití umělého osvětlení. Důsledkem bylo rychlé dozrávání plodů, ale zároveň extrémní spotřeba energie. Strategie se i přes vysokou spotřebu jevila poměrně úspěšnou až do října, kdy došlo k technickým problémům s připojením dálkového řízení jejich umělé inteligence. Tyto technické problémy zapříčinily extrémně nízké hodnoty zavlažování. Nedostatek vody způsobil propad v úrodnosti a poškození rostlin, z něhož se tým už nebyl schopen zotavit.

V důsledku technických problémů a vysoké spotřeby energie se umístili na posledním místě, s 27.5% ztrátou skóre za referenčním skleníkem.^[19]

Growers (referenční skleník)

Hustota osazení: 2.5 sazenice/m²

Nízké množství světla v prvních měsících pěstění, aby se rostliny lépe připravili na blížící se podzimní měsíce.

Jejich strategie zastřihávání a správný balanc hodnot prostředí způsobili že dosáhli nejnižšího procenta uhynulých plodů.

Jelikož světlo spotřebované plody, které uhynou je čistou ztrátou, nejmenší úhyn plodů napomohl nejvyšší efektivitě využití světla ze všech týmů.^[19]

Sonoma

Hustota osazení: 3.3 sazenice/m²

Umělá inteligence zaměřená na co možná nejvyšší osvětlení rostlin a z toho plynoucí navýšení spotřeby CO₂.

Množství světla bylo omezeno teplem produkovaným světelnými zdroji - tj. množství osvětlení bylo řízeno na základě teploty, kde limitem pro množství světla byl pouze stav, kdy už by osvětlení samotné způsobilo přehřívání rostlin.

Pro predikci teplot využili malého modelu založeného na strojovém učení.

Jako jediný tým dokázali překonat skóre referenčního skleníku, a to o 3.5%.^[19]

8.6.1 Vítězný přístup

Jelikož je Sonoma jediným týmem co překonal tradiční pěstitele, je vhodné jejich model rozebrat detailněji.

Jejich umělá inteligence se skládala z silného vědomostního základu pro pěstování okurek a algoritmu RL (reinforced learning) strojového učení. ^{[15][19]}

Reinforced learning nepotřebuje označené, párové vstupy a výstupy, tj. nepotřebuje znát že vstup X_{vstupu} zapříčinil hodnotu výstupu $X_{\text{výstupu}}$, snaží se pouze nalézt balanc mezi vloženou znalostní doménou a neprozkoumanou oblastí.

Algoritmus funguje tak, že s pravděpodobností $1 - \epsilon$ ($0 < \epsilon < 1$) vykoná akci na základě znalostní domény a s pravděpodobností ϵ učiní náhodnou akci. ϵ je voleno na základě toho, jak agresivně se má algoritmus pokoušet o změnu, tj. větší ϵ znamená rychlejší změny v systému a větší odchylky.

Do algoritmu vede vstup ve formě stavu prostředí a “odměny”. Pokud se stav prostředí na základě náhodné změny přiblížil stavu, jehož chce algoritmus dosáhnout, je “odměněn”, v opačném případě obdrží “lítost”. Množství odměny se odvíjí od míry přiblížení daným krokem k požadovanému stavu. Cílem algoritmu je nashromáždit co nejvíce odměny. Princip je vidět na Obr. 8.2.

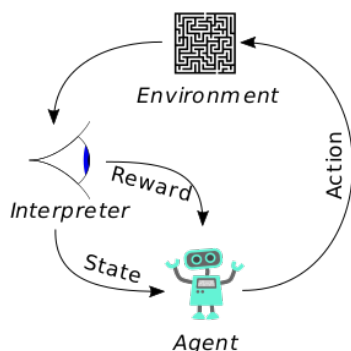
Takovýto algoritmus by se měl sám časem zlepšovat, proto lze předpokládat že při další soutěži by jeho efektivita byla vyšší. ^{[19][21]}

Při zpracování dat také využívají metody neúplných dat - RST (Rough Set Theory).

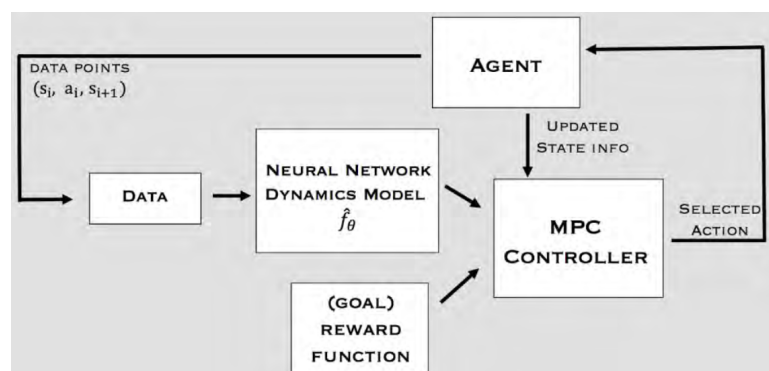
V obrázku celého modelu, Obr. 8.3, je vidět, že agent je napojen na MPC - Model predictive control, někdy také nazývaný receding horizon control, kontroler. MPC je pokročilou metodou, která umožňuje řízení procesu s danými omezeními. Spoléhá na dynamické modely daného procesu a umožňuje tedy predikci odezvy systému, umožňujíc úpravu řídicích akcí ještě než jsou aplikovány na reálný systém.

Princip je shodný s již uvedeným RHOC (kapitola 4.8).

Dynamický model, výstup z agenta a MPC kontroler dohromady tedy tvoří jakýsi virtuální skleník, na němž se algoritmus učí a následně aplikuje poznatky na reálný systém skleníku. ^{[13][15][19][20][21][23][24]}



Obrázek 8.2: Princip RL ^[16]



Obrázek 8.3: Celý model kontroly skleníku týmu Sonoma ^[15]

9 Závěr

Autonomní skleníky jsou extrémně komplexní a novou problematikou, opírající se o mnoho nedávno vzniklých vědeckých oblastí, včetně neuronových sítí, strojového učení a pokročilé regulace. Využívány jsou také znalosti z jiných oblastí, jako jsou pěstitelství, energetika, meteorologie nebo strojní a stavební inženýrství.

Principy a pojmy, které jsou v problematice regulace a řízení autonomních skleníků nejlépe aplikovatelné, byly v této práci vysvětleny. S tím i související množství aktuátorů, řídicích prvků a senzorů. Funkce a principy nejdůležitějších z aktuátorů byly popsány.

I když jsou autonomní skleníky stále na začátku vývoje a odborníci se zabývají spíše regulací jen několika málo částí prostředí najednou, nikoliv celkem, nedávná soutěž dokázala, že i v poměrně krátkém čase je několikačlenný, ne zcela profesionální tým schopen sestavit umělou inteligenci založenou na strojovém učení, která je s pomocí adekvátního modelu schopna během pár měsíců překonat zkušenosti a práci profesionálních pěstitelů. To napovídá, že lze v budoucnu snadno dosáhnout ještě vyšších výnosů, efektivity a výkonu těchto skleníkových systémů, což umožní další navýšení produkce potravin při zachování pěstelské plochy a redukci kvantity personálu.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] PONCE, Pedro, MOLINA, A., CEPEDA, P., LUGO, E., MACCLEERY, B.. *Greenhouse Design and Control*. London, CRC Press, 2015, ISBN 9780429227325
- [2] LEAN Yu, SHOUYANG Wang, KIN Keung Lai, *Basic Learning Principles of Artificial Neural Networks*. In: *Foreign-Exchange-Rate Forecasting With Artificial Neural Networks*. Boston: Springer MA, 2007 , ISBN 978-0-387-71720-3
- [3] RAQUEL, SALAZAR & LOPEZ-Cruz, IRINEO & ROJANO & SCHMIDT & DANNEHL. Tomato yield prediction in a semi-closed greenhouse. 2015, *Acta Horticulturae*. 1107. 263-270. 10.17660/ActaHortic.2015.1107.36.
- [4] RODRÍGUEZ, Francisco, BERENGUEL, Manuel, GUZMÁN, José Luis, RAMÍNEZ, Armando. *Application of adaptive fuzzy controller in intelligent greenhouse control system*, 2008, US: IEEE, ISBN: 978-3-319-11134-6
- [5] FANG, X., JUNQIANG, S., JIAOLIAO, C.. *"Rough Sets Based Fuzzy Logic Control for Greenhouse Temperature*, 2006, US: IEEE, ISBN: 0-7803-9721-5
- [6] FANG & CHEN, JIAOLIAO & ZHANG, LIBIN & ZHAN, HONGWU. *Real Coded Genetic Algorithm for Optimizing Fuzzy Logic Control of Greenhouse Microclimate*. 2006, Boston, Springer International Publishing, ISBN 978-3-540-37256-1
- [7] JOHNSON, Khari, *Why Microsoft, Tencent, and Intel are growing cucumbers in autonomous greenhouses* [online], VentureBeat, 2018 [cit. 2020-2-10]. Dostupné z: <https://venturebeat.com/2018/11/12/why-microsoft-tencent-and-intel-are-growing-cucumbers-in-autonomous-greenhouses/>
- [8] BOLTON, William, *Instrumentation and Control Systems (Second Edition)*, 2015, Oxford/Boston: Newnes Books, ISBN: 9780081006214
- [9] ALRIFAEI, Bassam. *Networked Model Predictive Control for Vehicle Collision Avoidance*, 2017, 10.18154/RWTH-2017-04199. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318233447_Networked_Model_Predictive_Control_for_Vehicle_Collision_Avoidance
- [10] DAN Xu, SHANGFENG Du, Gerard van WILLIGENBURG, *Adaptive two time-scale receding horizon optimal control for greenhouse lettuce cultivation*, 2018-03-01, Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323491776_Adaptive_two_time-scale_receding_horizon_optimal_control_for_greenhouse_lettuce_cultivation

- [11] MEKONTSO, CHARLES & ABDULKARIM & MADUGU, IBRAHIM & IBRAHIM, OLADIMEJI & ADEDIRAN, YINUSA. *Review of Optimization Techniques for Sizing Renewable Energy Systems*, 2019, Computer Engineering and Applications Journal vol. 8. 10.18495/comengapp.v8i1.285.
- [12] DIETERLE, Frank. *Principle of Neural networks* [online], 2019-03-03 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: http://www.frank-dieterle.de/phd/2_7_1.html
- [13] GIZZI, FABRIZIO & MASINI, NICOLA & POTENZA, MRIA & CINZIA, ZOTTA & TILIO, LUCIA & DANESE, MARIA & MURGANTE, BENIAMINO. *Assessing Macroseismic Data Reliability through Rough Set Theory: Application on Vulture Area (Basilicata, Southern Italy)*, 2010, Boston: Springer. ISBN: 978-3-642-14616-9
- [14] ENTICO, Ellain Joy. *What are the different Hydroponic systems* [online], 2019-12-17 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://greenoptions.ph/2019/12/17/what-are-the-different-hydroponic-systems/>
- [15] RIGHINI, Isabella. *Autonomous Greenhouse Challenge* [PowerPoint prezentace], 2019-02-13 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www.novelfarmexpo.it/wp-content/uploads/2019/03/RIGHINI-Isabella_NVF19.pdf
- [16] “Megajuce”, *Reinforced Learning diagram* [online], 2017-4-10 [cit. 2020-3-15], Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Reinforcement_learning_diagram.svg
- [17] BRILLIANT.ORG, *Feedforward Neural Networks* [online], [cit. 2020-4-18]. Dostupné z: <https://brilliant.org/wiki/feedforward-neural-networks/>
- [18] SERON, Mária M.. *Receding Horizon control* [Power Point prezentace], 2004-9 [cit. 2020-4-12]. Dostupné z: <https://www-eng.newcastle.edu.au/eecs/cdsc/book/s/cce/Slides/RecedingHorizonControl.pdf>
- [19] HEMMING, Silke, ZWART, Feije, ELINGS, Anne, RIGHINI, Isabella, PETROPOULOU, Anna. *Remote Control of Greenhouse Vegetable Production with Artificial Intelligence — Greenhouse Climate, Irrigation, and Crop Production* [online]. 2019-04-16 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1807/htm>
- [20] BABUSKA, Robert, MAMDANI, Ebrahim, Scholarpedia.org, *Fuzzy Control* [online], 2008-02-29 [cit. 2020-3-15]. Dostupné z: http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control
- [21] OSIŃSKI, Błażej, BUDEK, Konrad. *What is reinforcement learning? The complete guide* [online], 2018-07-05 [cit. 2020-4-17]. Dostupné z: <https://deepsense.ai/what-is-reinforcement-learning-the-complete-guide/>

- [22] BROGAN, William, HALL, Prentice. *Modern Control Theory, 3rd edition, Full-State Observer Notes and Example*. 1991 [cit. 2020-2-21]. Dostupné z: shorturl.at/jrux5
- [23] SKOWRON, Andrzej, DUTTA, Soma. *Rough sets: past, present, and future*. [online]. 2018-07-25 [cit. 2020-2-16]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11047-018-9700-3>
- [24] Paris-Sorbonne University. *Rough Set Theory* [online], 2011-12-15 [cit. 2020-03-15], Dostupné z: <http://www.celta.paris-sorbonne.fr/anadem/Semana-Corner/RST.html>
- [25] MALLAWAARACHCHI, Vijini. *Introduction to Genetic Algorithms — Including Example Code* [online], 2017-07-08 [cit. 2020-14-02]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3>
- [26] Farm Energy, *Horizontal airflow is best for greenhouse circulation* [online], 2019-04-03 [cit. 2020-2-11], Dostupné z: <https://farm-energy.extension.org/horizontal-air-flow-is-best-for-greenhouse-air-circulation/>
- [27] WATSON, J. A., GÓMEZ, C., BUCKLIN, R. A., LEARY, J. D., MCCONNEL, D. B.. *Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems* [online], 2019-09-27 [cit. 2020-1-27]. Dostupné z: <https://edis.ifas.ufl.edu/ae069>
- [28] SANFORD, Scott. *Greenhouse Unit Heaters – Types, placement and efficiency*. [online] 2019-12-27 [cit. 2020-28-1]. Dostupné z: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0145/8808/4272/files/A3907-02.pdf>
- [29] Growspan, *FIVE REASONS RADIANT HEATING SHOULD BE IN YOUR GREENHOUSE*. 2016-12-15 [cit. 2020-1-16]. Dostupné z: <https://www.growspan.com/news/five-reasons-radiant-heating-greenhouse/>
- [30] HEMMING, Silke. *Autonomous Greenhouse Challenge — Final Result* [PowerPoint prezentace]. 2019-12-13 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: http://www.autonomousgreenhouses.com/media/final_presentation.pdf

Seznam Obrázků

- Obrázek 3.1:** Schéma autonomního skleníku
- Obrázek 3.2:** Vnitřní prostor autonomního skleníku Wageningenské univerzity
- Obrázek 4.1:** Složení FPGA
- Obrázek 4.2:** Schéma kaskádové smyčky
- Obrázek 4.3:** Příklad kaskádové regulace množství vody v nádrži
- Obrázek 4.4:** Architektura embedded systému
- Obrázek 4.5:** 1:1 konfigurace
- Obrázek 4.6:** N:N konfigurace
- Obrázek 4.7:** Princip RHOC
- Obrázek 4.8:** Příklad toho, jak by mohl vypadat systém autonomního skleníku využívajícího RHOC
- Obrázek 5.1:** Logický princip neuronové sítě
- Obrázek 5.2:** Základní schéma 3 vrstvé backpropagation neuronové sítě
- Obrázek 5.3:** Princip RST
- Obrázek 6.1:** Funkce senzoru
- Obrázek 6.2:** Vstupy senzorů autonomního skleníku
- Obrázek 7.1:** NFT systém
- Obrázek 8.1:** Schéma operační architektury použitých skleníků
- Obrázek 8.2:** Princip RL
- Obrázek 8.3:** Celý model kontroly skleníku týmu Sonoma